

はやぶさ2 地球・月スイングバイの科学成果：TIR+LIDAR

Scientific achievements during Earth-Moon swingby of Hayabusa2: TIR+LIDAR

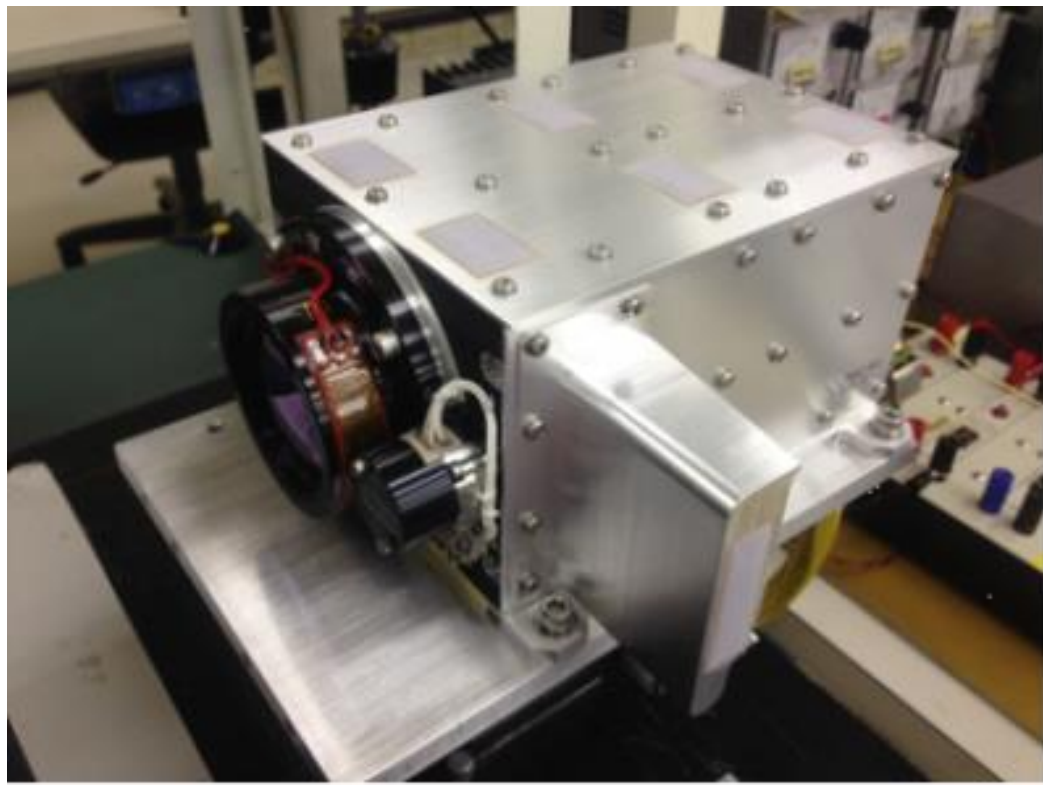
岡田達明¹, 福原哲哉², 田中智¹, 荒井武彦³, 千秋博紀⁴, 出村裕英⁵, 小川佳子⁵, 神山徹⁶, 関口朋彦⁷, 坂谷尚哉⁸, 滝田隼⁹, 堀川大和¹⁰, 野田寛大¹¹, 國森裕生¹², 水野貴秀¹, 尾川順子¹³, 竹内央¹, Chris Moore¹⁴, Alex Pollard¹⁴, 山口智宏¹³, 並木則行¹¹, 加瀬貞二¹⁵, 佐伯孝尚¹³, 津田雄一¹³
¹宇宙科学研究所, ²立教大学, ³国立環境研究所, ⁴千葉工業大学, ⁵会津大学, ⁶産業技術総合研究所, ⁷北海道教育大学, ⁸明治大学, ⁹東京大学大学院, ¹⁰総合研究大学院大学, ¹¹国立天文台, ¹²情報通信研究機構, ¹³宇宙航空研究開発機構, ¹⁴ Space Environment Research Centre, ¹⁵日本電気

1. TIRの地球・月の熱放射遠距離測定実験：測定強度と距離依存性

中間赤外カメラTIRによる地球・月の観測を最大2000万kmまでの距離と熱放射強度の関係を調査し、小惑星接近時の小惑星やその衛星の検出可能性について知見を得た。

1.1 概要

- TIRで検知する天体の熱放射のエネルギーと検知強度の関係を調査する。
- TIRの検知下限値は地上では未確認である(試験系の設定が難しいため)。
- 熱放射量の定量的見積りが可能な地球や月を地球スイングバイの前後の接近時と離脱時にTIRで撮像した。
- そのときに得られる検知強度と距離の関係を調査し、ノイズレベルと比較することで、TIRの検知下限値を算出する。
- さらに、小惑星接近時における小惑星Ryuguの検知可能な距離、およびApproachフェーズ(＜約3000 [km])における熱撮像のS/Nについて考察する。



Items	Specifications
Total Mass	3.28 [kg]
Total power	20 [W]
Detector	NEC 320 UMBA (AR coating)
Pixel Numbers	328 x 248 (effective)
Pixel Size	37 [μm]
FOV	16.7 x 12.6 [deg]
IFOV	0.051 [deg]
Wavelength	8 ~ 12 [μm]
Temp Range	150 to 440 [K]
NETD	<0.3 [K] for 230-400K
Absolute ΔT	<2 [K] for 230-400 K
Ge Lens F-value	1.4
MTF	>0.5 (at Nyquist freq)
ADC	12 [bit]
Summation	2^N (N=0, 1, ..., 7)

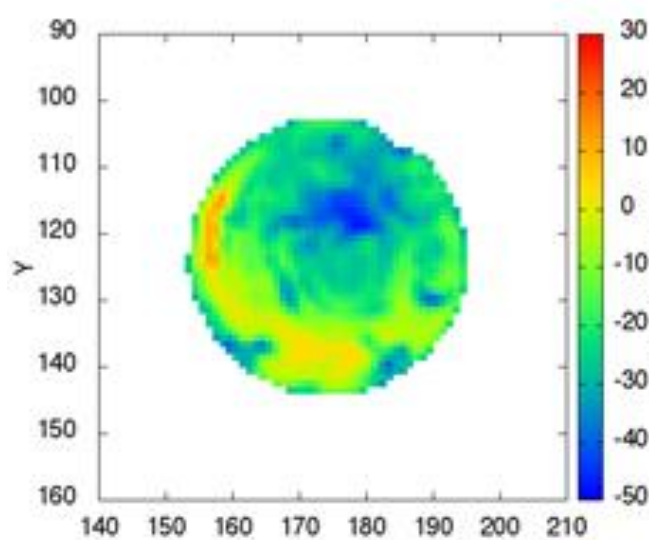
1.2 実験手法

- 地球スイングバイ運用における接近時、および離脱時において探査機の-Z軸を地球(または月)指向させて撮像した。TIRの視野は16° x 12° と比較的広いため、探査機の厳密なポインティングは必要ないが、姿勢を接近時に約52° ~ 53°、離脱時に約53° ~ 60° 傾ける必要があった。
- 撮像は接近時に10/14, 16, 11/10 ~ 13, 26, 離脱時に12/4 ~ 21に実施した。
- 本報告では至近距離を除く観測データの一部(10/14, 16, 11/10, 13, 12/9, 12, 15, 18, 21)のデータを使用し、検出強度と観測距離の傾向について調査した。

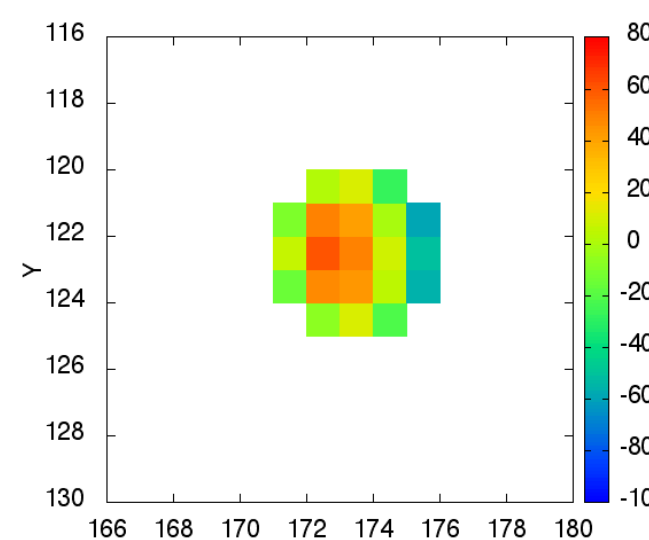
観測日時	距離 [km]	対象
2015-10-14T15:00:00	2.05 x 10 ⁷	地球・月
2015-10-16T15:00:00	1.96 x 10 ⁷	地球・月
2015-11-10T10:30:10	9.23 x 10 ⁶	地球・月
2015-11-11T10:30:10	8.92 x 10 ⁶	地球・月
2015-11-12T10:30:10	8.52 x 10 ⁶	地球・月
2015-11-13T10:30:10	8.11 x 10 ⁶	地球・月
2015-11-26T06:15:00	2.93 x 10 ⁶	地球・月
2015-12-04T04:06:00	3.36 x 10 ⁵	地球
2015-12-04T04:50:02	3.51 x 10 ⁵	地球・x-2°, y-2°
2015-12-04T05:40:00	3.66 x 10 ⁵	地球
2015-12-05T11:46:00	8.82 x 10 ⁵	月
2015-12-05T12:30:03	8.95 x 10 ⁵	月・x-3°, y-3°
2015-12-06T14:10:03	1.33 x 10 ⁶	月・y-5°
2015-12-06T15:40:00	1.35 x 10 ⁶	地球
2015-12-07T05:40:03	1.59 x 10 ⁶	地球・x-3°, y-3°
2015-12-08T00:35:03	1.90 x 10 ⁶	地球
2015-12-08T07:30:10	2.02 x 10 ⁶	地球
2015-12-09T18:30:10	2.60 x 10 ⁶	地球・月
2015-12-10T18:30:10	3.00 x 10 ⁶	地球・月
2015-12-11T18:30:10	3.40 x 10 ⁶	地球・月
2015-12-12T18:30:10	3.80 x 10 ⁶	地球・月
2015-12-13T18:30:10	4.20 x 10 ⁶	地球・月
2015-12-14T18:30:10	4.60 x 10 ⁶	地球・月
2015-12-15T18:30:10	5.00 x 10 ⁶	地球・月
2015-12-16T18:30:10	5.40 x 10 ⁶	地球・月
2015-12-17T18:30:10	5.80 x 10 ⁶	地球・月
2015-12-18T18:30:10	6.20 x 10 ⁶	地球・月
2015-12-19T18:30:10	6.60 x 10 ⁶	地球・月
2015-12-20T18:30:10	6.99 x 10 ⁶	地球・月
2015-12-21T18:30:10	7.39 x 10 ⁶	地球・月

1.3 結果

- TIRによる地球・月の熱撮像画像と、同観測条件での深宇宙画像の差分画像を解析に使用した。
- TIRは探査機の-Z面を始めて地球指向させた2015/10/14に地球と月の検出に成功した。この時点で地球は1画素の面積の45 [%] (2/3サイズ)、月は1画素の面積の3 [%] (1/6サイズ=0.15 [mrad])であった。
- 距離200万 [km] ~ 2000万 [km] において、地球や月がTIRの画素サイズ以下であっても、検知強度が距離の2乗に反比例($\propto R^{-2}$)する関係が確認された。



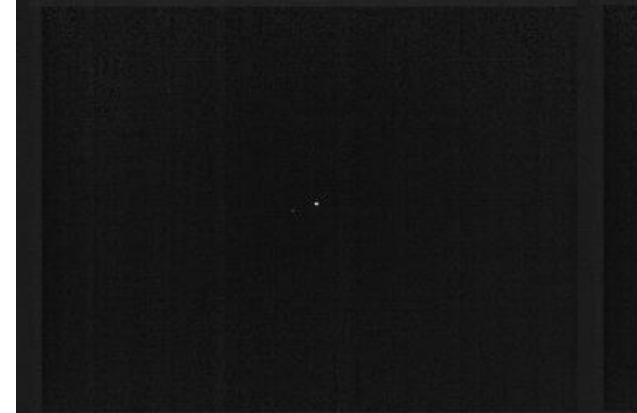
2015/12/04 地球撮像



2015/12/05 月撮像

[Arai, T. et al., LPSC 2016]

2015/10/14



2015/11/10



2015/12/09

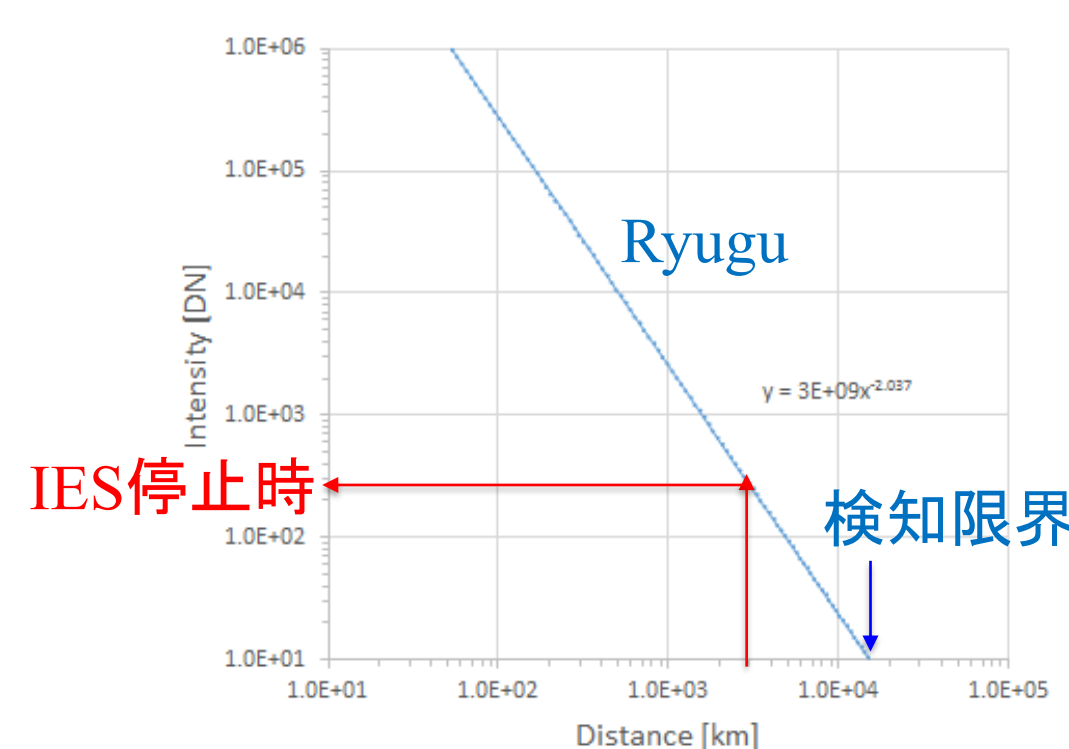
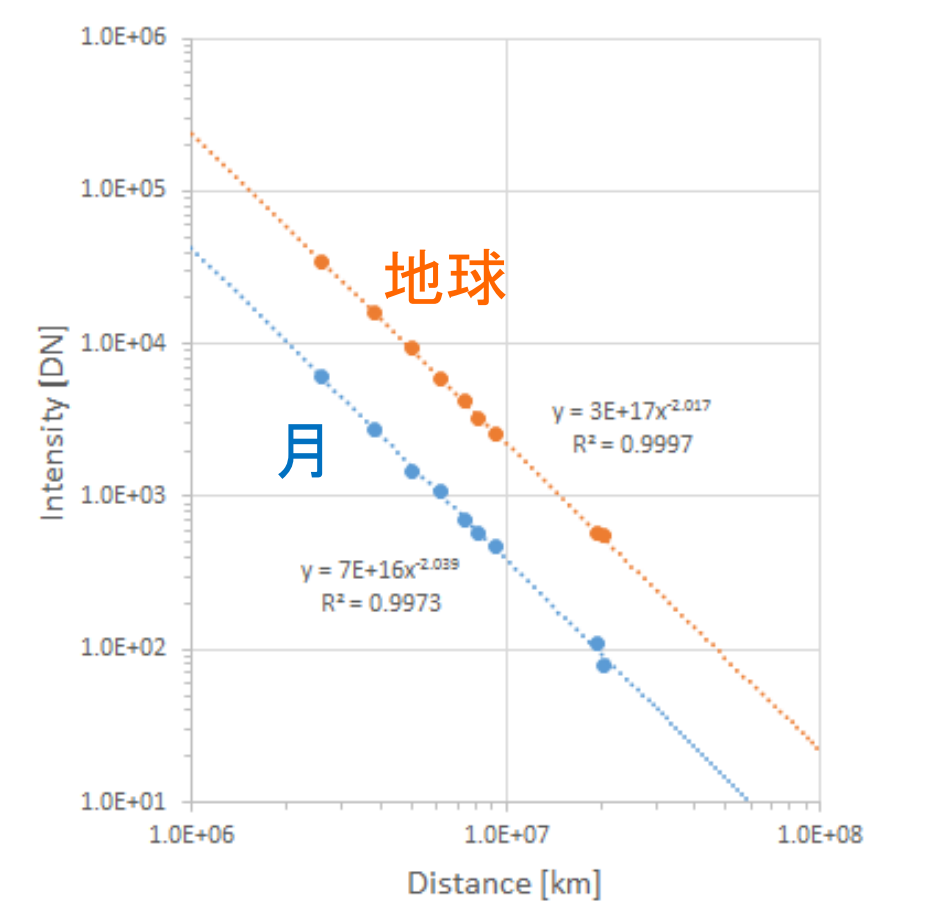


2015/12/15



1.4 考察

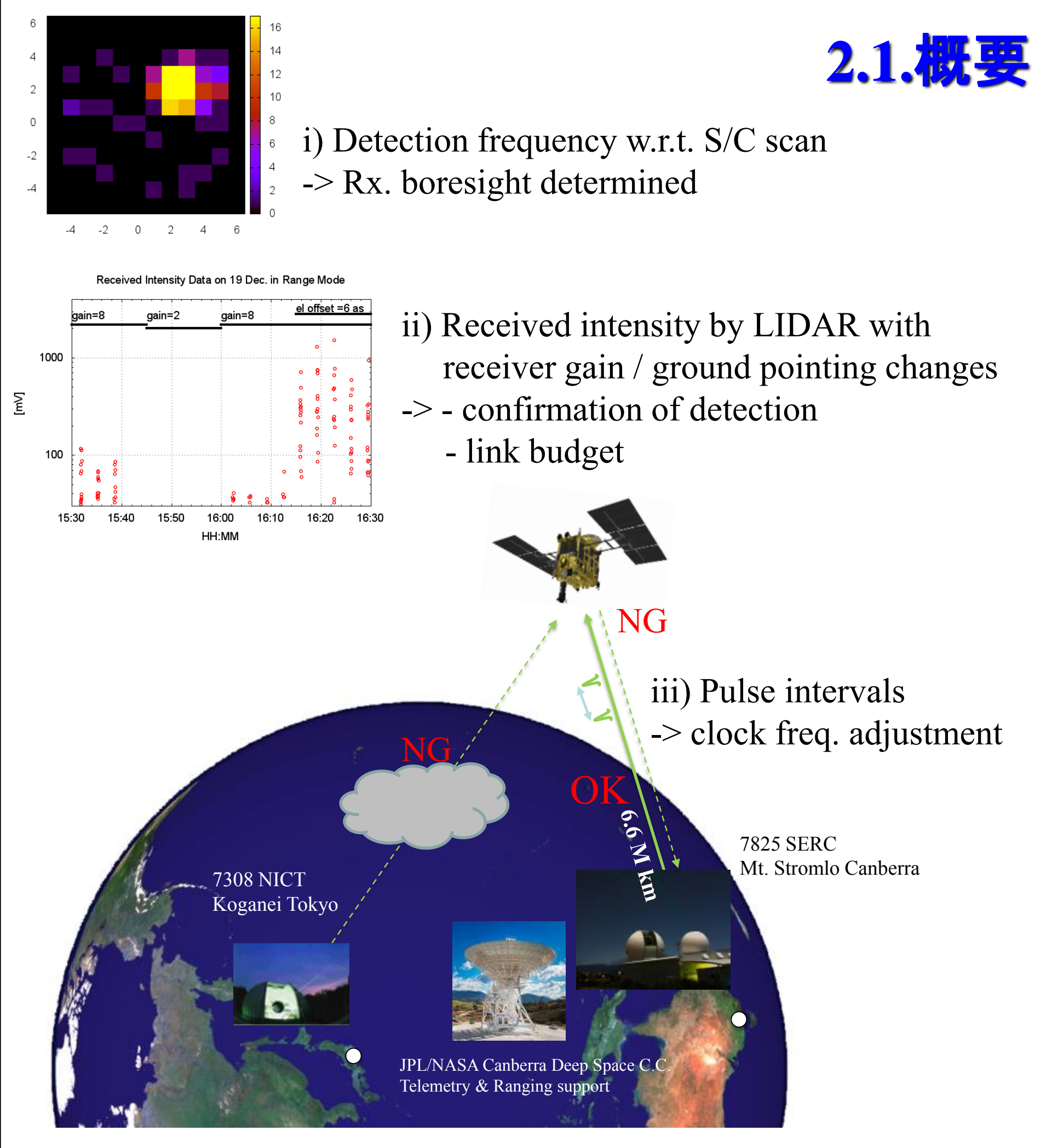
- TIRは画素以下であっても熱放射の検知強度が距離の2乗に反比例($\propto R^{-2}$)することから、熱放射強度の定量化を保持していることが分かった。
- TIR画像(深宇宙画像との差分後)のノイズレベル(局所的なランダムさの標準偏差)は約3 [DN] であるため、検出限界をここでは約3σに相当する10 [DN] と仮定すると、月で約6000万 [km] まで検出可能である。
- 検出限界は、月(角度53° ~ 60°)で観測の場合、太陽距離(1AU)で3.5x10³ [km] / 6x10⁷ [km] = 6x10⁻⁵ [rad] (=0.06 [mrad])である。
- Ryugu接近時の場合、太陽距離(1AU)でC型小惑星(月よりも低アルベド~0.05)かつ太陽方向からの接近で月観測時よりも熱放射の多い条件(TIRにとって有利な条件)のため、検出限界(0.06 [mrad])を適用すると、1.5x10⁴ [km] からS/N > 3 で観測可能である。また、IES運転終了後の小惑星指向時は太陽距離3000 [km] (限界距離の1/5)では強度300 [DN] 以上が期待される。



2. LIDAR光リンク実験 (Noda et al., Earth, Planets, and Space, accepted 2016)

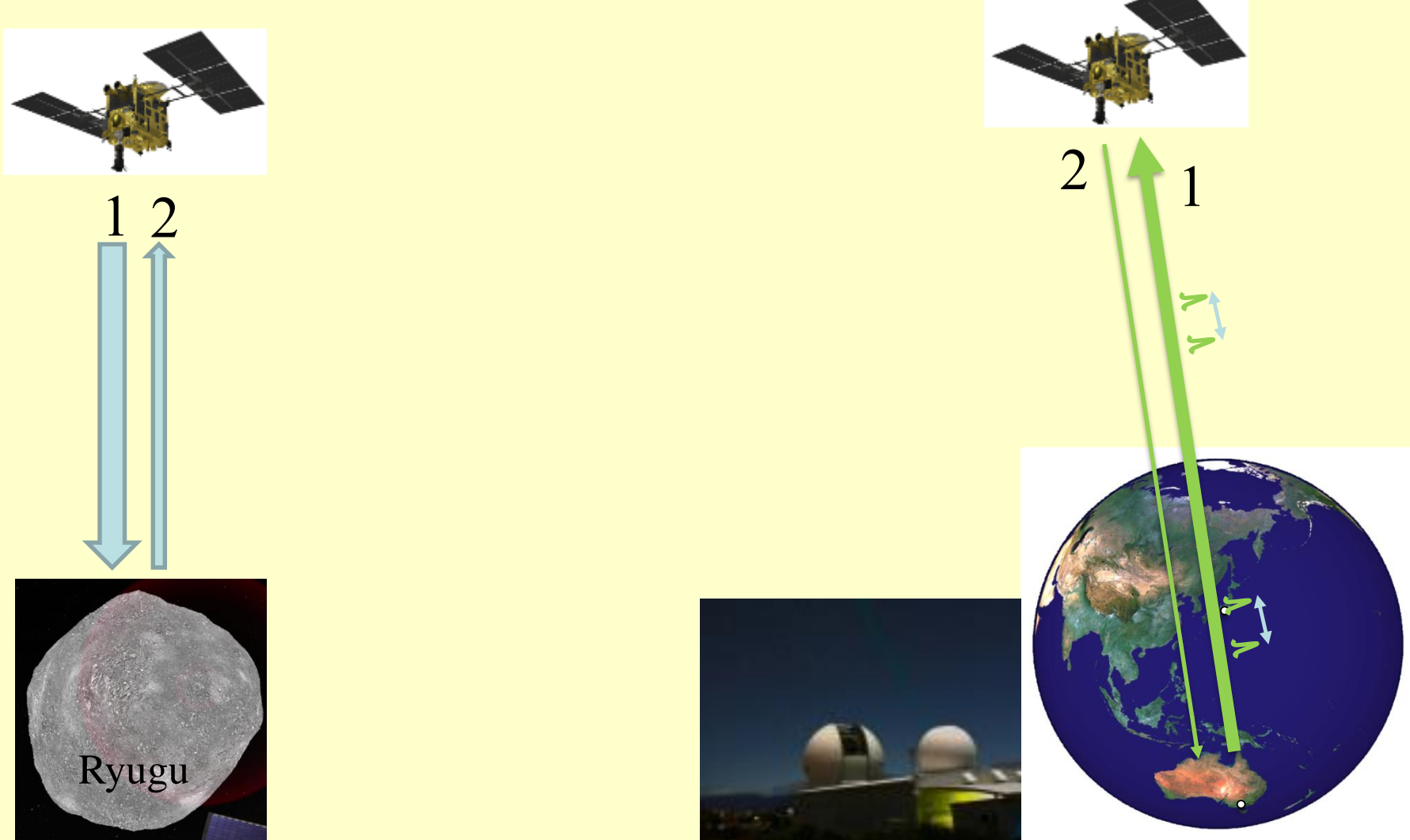
レーザ高度計LIDARと地上局とのレーザリンク実験を実施し、距離660万kmにおいて、地上からの1-wayレーザリンクが確立できた。これにより探査機座標系でのLIDARの受信視野方向が確定した。

2.1.概要



2.3. 実験手法

通常の測距モード(下図 左)では1秒周期で1パルスが送信され、反射パルス待ち受ける。光リンク実験で用いられたトランスポンダーモード(下図 右)では、1秒間の待受け時間内に2つのパルスが受信できる。2つのパルス間隔はテレメトリデータとしてダウンリンクされる。2秒ごとに1組のパルス受信データが記録される。



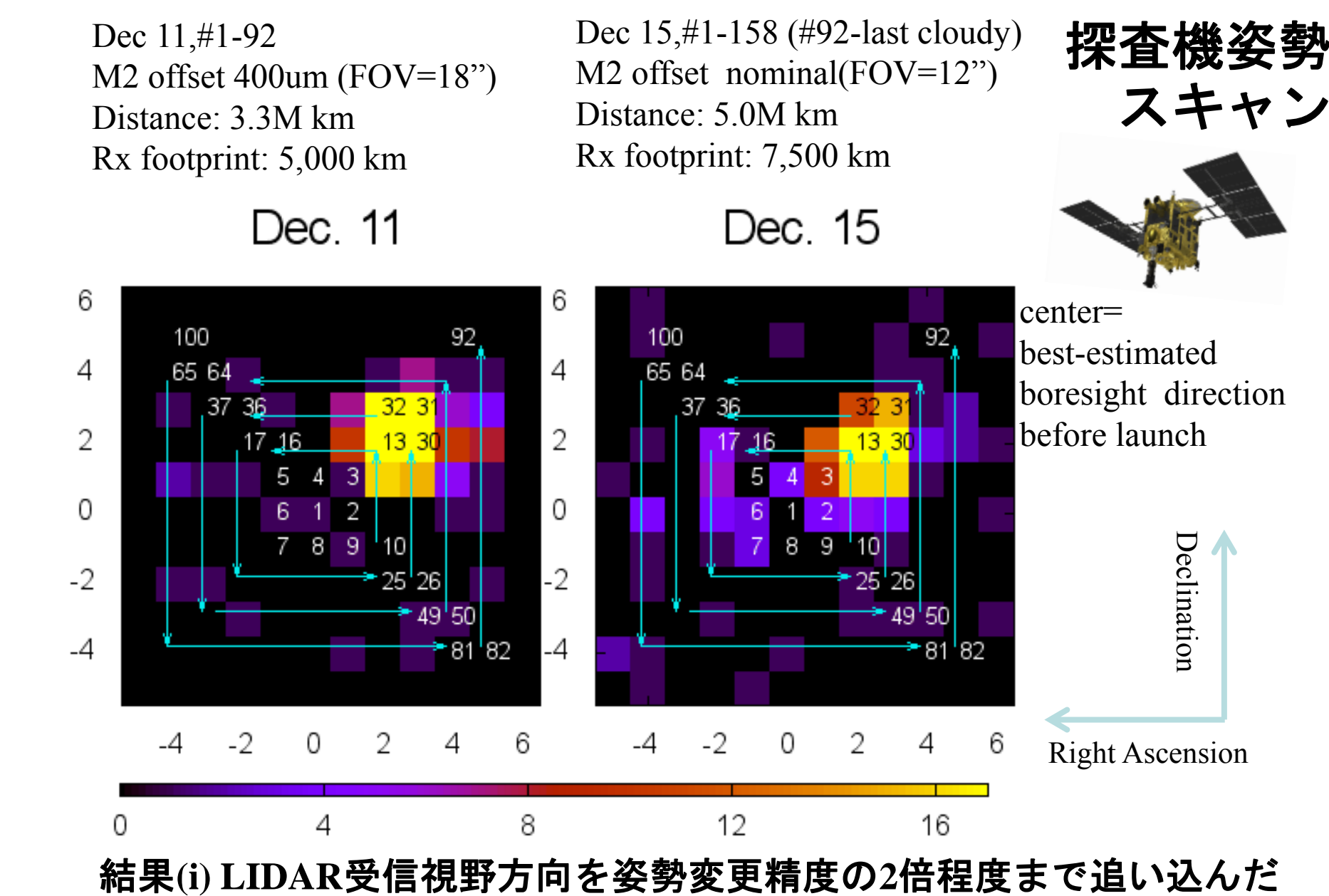
地上局には情報通信研究機構(小金井)のレーザを改修して使用。南半球からの観測のためにオーストラリアMt. Stromlo局 (Space Environment Research Centre) の支援も受けた。

	NICT Koganei (JPN)	Mt. Stromlo (AUS)
transmitter	Q-SW Nd:YAG	Q-SW Nd:YAG
laser wavelength, nm	1064	1064
Pulse energy, J	1	2.2
Pulse width, ns	10	15
Beam divergence, arcsec	10	12
Repetition rate, Hz	10	170
receiver	InGaAs APD-array	IR enhanced Si-APD
Telescope diameter, m	1.5	1.8

探査機運用

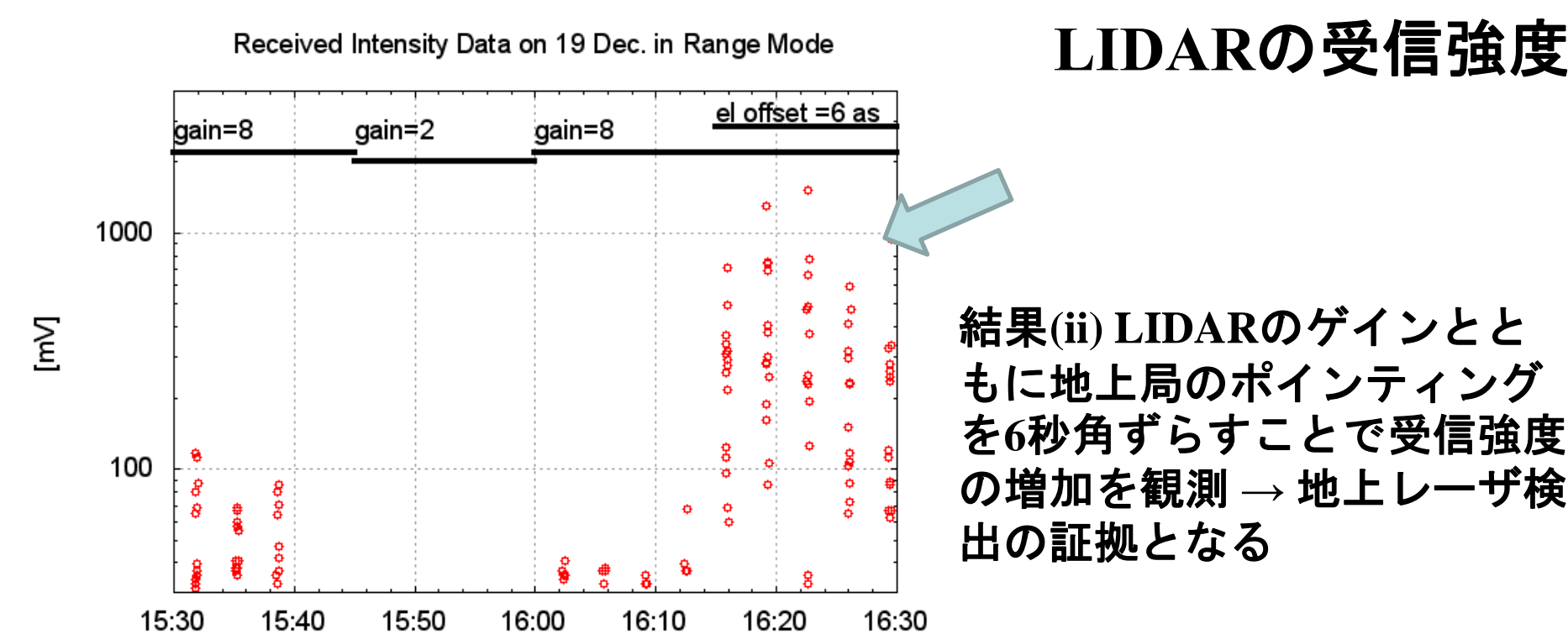
- LIDAR受信視野方向を確認するために、光リンク実験期間中に探査機の姿勢スキャンを実施した。トランスポンダーモードでは、
- 姿勢変更は1 mrad刻みで40秒ごと
 - スキャン範囲は1 deg x 1 deg
 - 1刻みごとに最大で17ショットのパルスが受信可能
 - 受信フラグとパルスインターバルがダウンリンクされる
- 2015年12月19日には測距モードで地上局ポインティング運用を実施した。
- 受信強度の観測

探査機姿勢スキャン



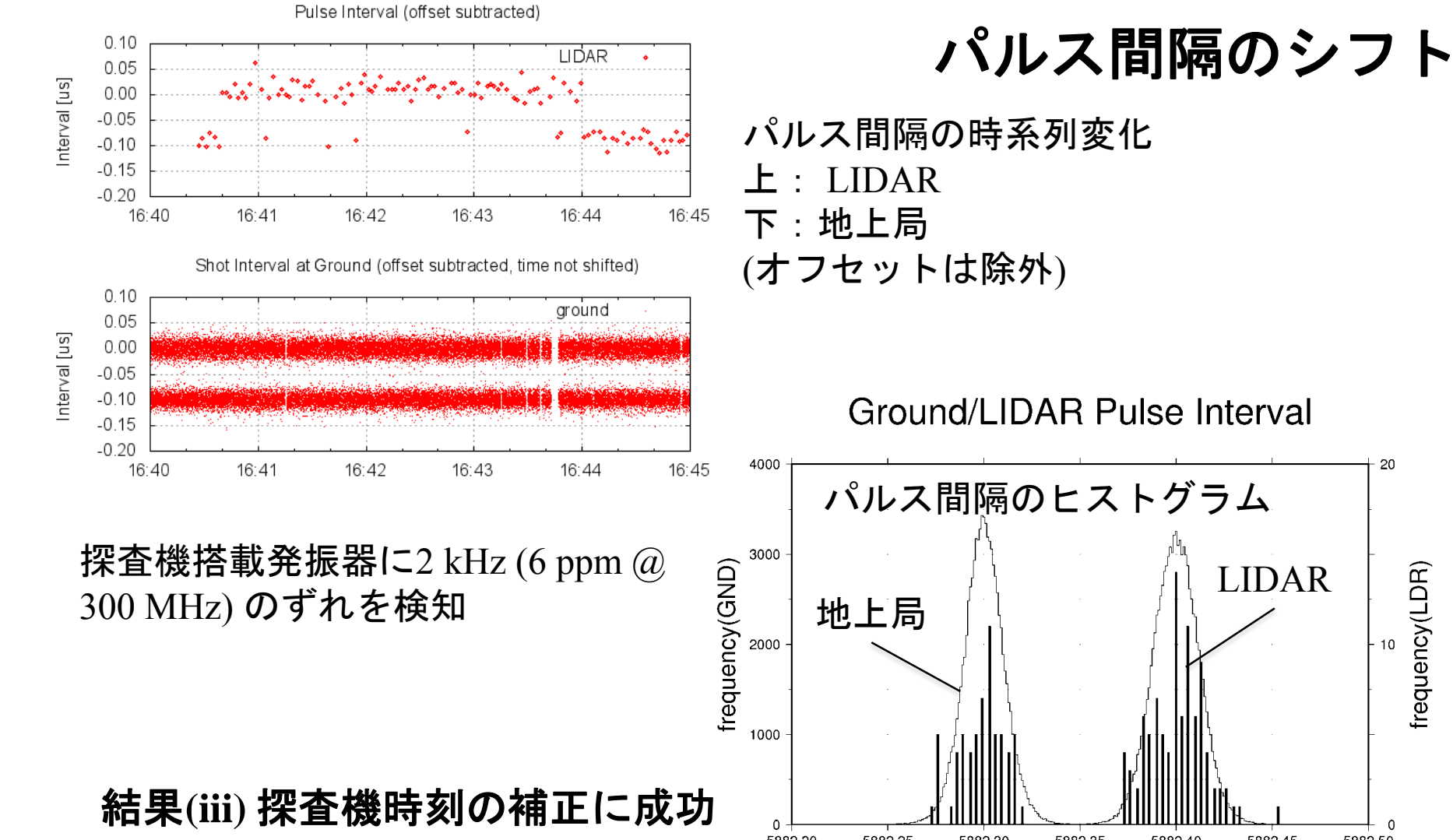
結果(i) LIDAR受信視野方向を姿勢変更精度の2倍程度まで追いつ込んだ

LIDARの受信強度



結果(ii) LIDARのゲインとともに地上局のポインティングを6秒角ずらすことで受信強度の増加を観測 → 地上レーザ検出の証拠となる

パルス間隔のシフト



結果(iii) 探査機時刻の補正に成功